

2018年スラウェシ島地震による 大規模長距離地盤流動に関する継続調査



東京大学 生産技術研究所
清田 隆

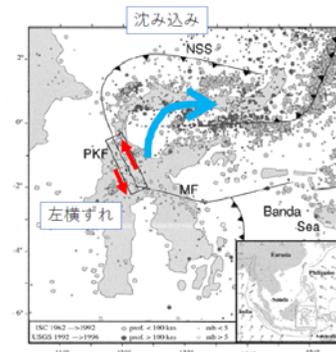
地震概要

- 2018年9月28日6:02PM
- Mw 7.5 (Depth 10km)
- 左横ずれ断層



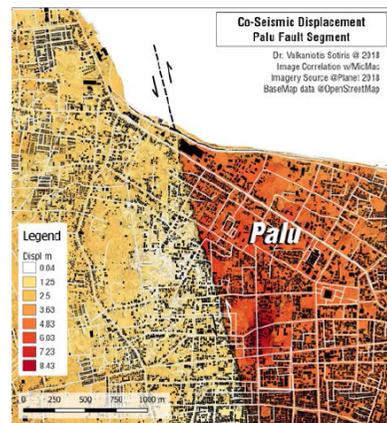
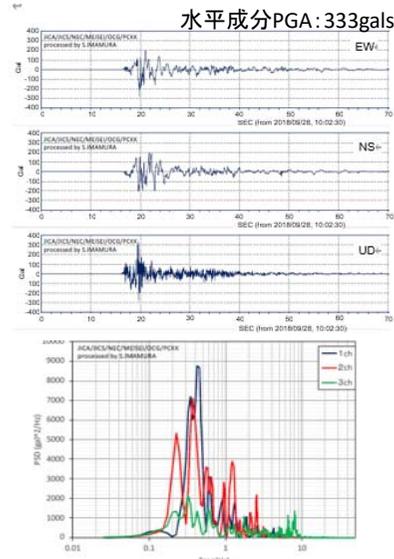
- 死者: 2101人
- 行方不明: 1309人
- 構造物被害: 6000棟

The National Agency of Disaster Management,
"Gempa Bumi Sulteng," 13 11 2018. [Online]



断層変位と地震動

吉見氏 (2018/12/3 報告会資料)

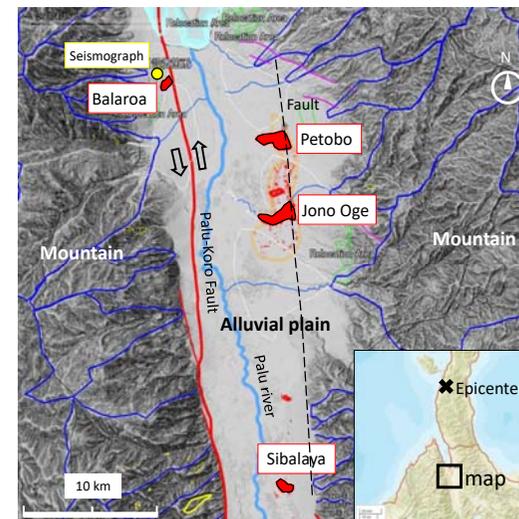


地震計

Valkanotis ほか (2018)

BKMG and JICA, 2018

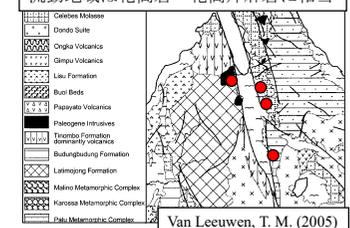
Field survey



地形・地質概要

- ◆ 東西の山脈に挟まれた幅約10kmの沖積低地。地すべりはPalu川を挟んで東西の扇状地で発生
- ◆ 地震を生じさせたPalu-Koro断層がPalu川西部に南北に走る。東部には平行する正断層
- ◆ 沖積低地は pull-apart 断層活動により発達

流動地域は花崗岩・花崗片麻岩に相当



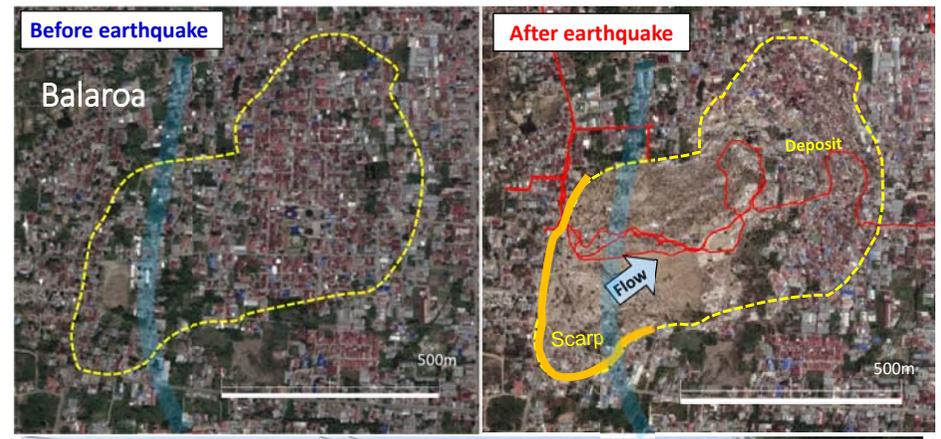
Van Leeuwen, T. M. (2005)

JICA advisory team (core-member)

1. Kenji ISHIHARA
2. Takaji KOKUSHO
3. Susumu YASUDA

4. Ikuo TOWHATA
5. Mitsu OKAMURA
6. Hemanta HAZARIKA
7. Kenji WATANABE

- Today's presenter
8. Takashi KIYOTA



地震前の斜面勾配: 4% (2~3 deg)



流動域の中部。地表面は湿地帯となり、歩行も困難

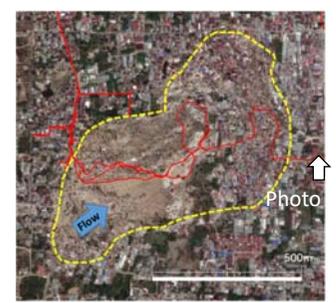


流動土塊の堆積部。地盤は大きく隆起するも、**至る所で湧水を確認**



流動土塊の堆積部。モスクは何度も回転しながら**250m**流下し転倒 (**流動地盤は盤状ではなかった**)

Balaroa



流動地域の下流部(外側)

地震前と比較して、水路の水は明らかに多い。流動地域から供給された



Before earthquake



After earthquake

断層の直近でも構造物被害は限定的

Bararoaで撮影された動画

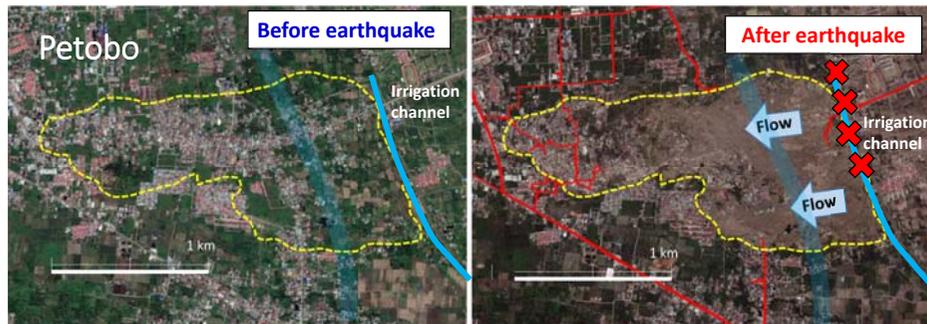


- 動画開始時には地面の軟化と流動の始まる様子が確認できる。明瞭な噴砂は見えないが、かなり保水した粘性を有する土が表面を覆っている様子が見られる。
- 約17秒後には**自転車程度の速度?**で流動している
- 家屋は流動している途中で倒壊。**地震動による被害は限定的**

目撃者インタビュー

When the ground waved up, big cracks on the ground appeared and vice versa, when the ground waved down, those cracks were shut. This movement made all the building on the ground collapsed. After the shock, mudflow started to appear and pushed the houses to the lower elevation.

Balaroaクラウドでの映像分析



地震前の斜面勾配: 2~3% (1~2 deg), 流動斜面上部に灌漑用水路があり、大きな被害を受けた。灌漑用水路の建設により流動域の地下水が上昇したらしい(住民談)



Petobo



Jono Oge



斜面勾配: 1~2% (0.5~1 deg)

流動面積は最も広く、流動距離も最も長い。一方、最も緩傾斜であった。ここでも流動斜面上部に灌漑用水路が存在し、大きな被害を受けた



Jono Oge



流動斜面上部の灌漑用水路のゲートの被害



下流部では地震から10分後に洪水が押し寄せ、1時間続いた



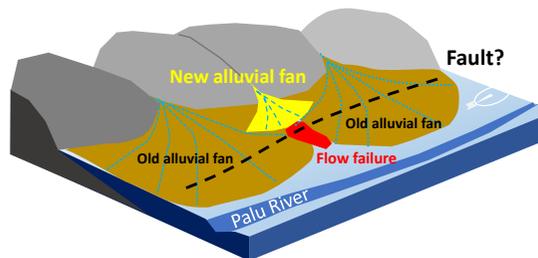
洪水により河川水面は約7m上昇

長距離地盤流動の発生個所の共通点



すべての流動箇所は湿地と化していたり、大量の湧水が確認された。地すべり地の地下水は**被圧**されていた可能性

東西の2000m級の山の麓に形成された扇状地 → **被圧水**の存在を伺わせる

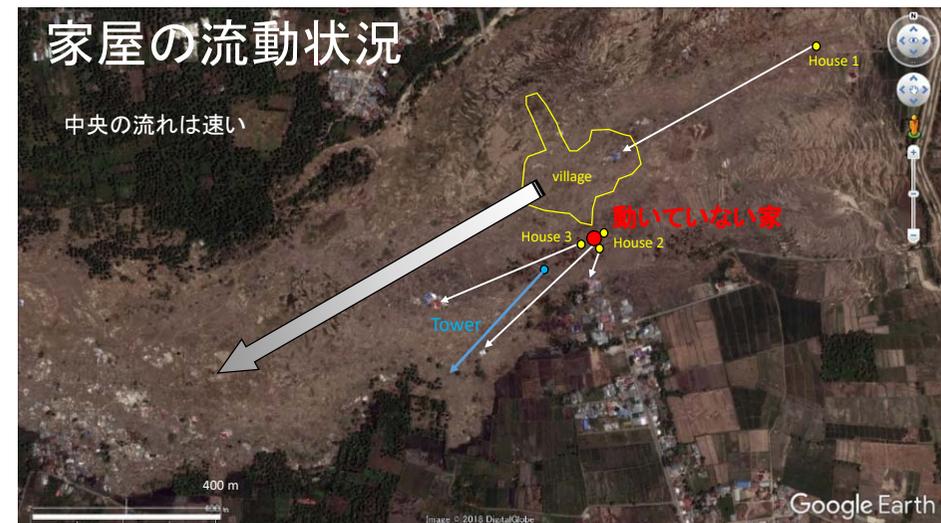


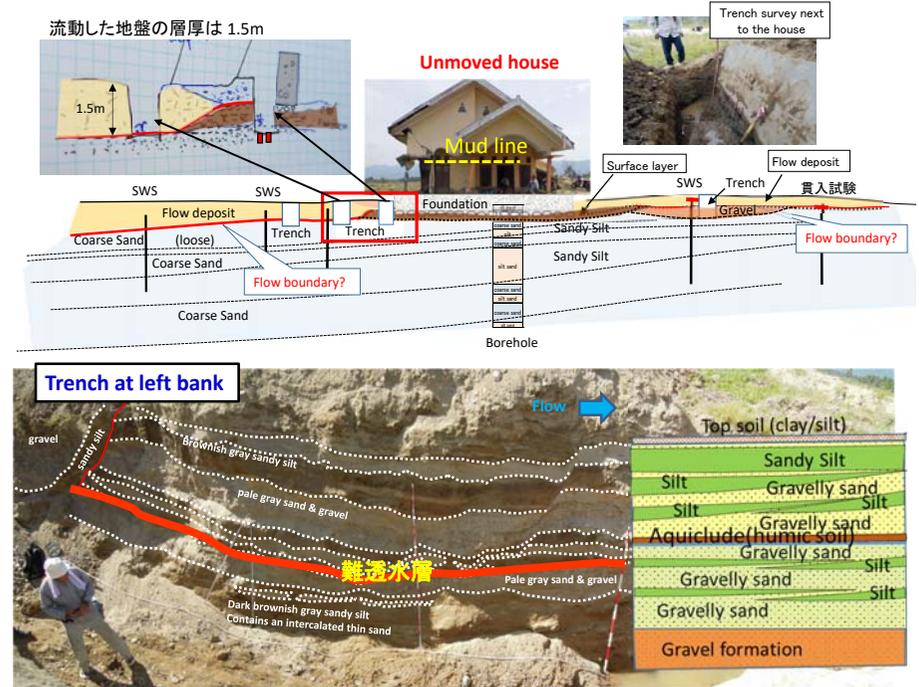
さらに、長距離地盤流動は古い扇状地間に形成された新しい扇状地の直下で発生。水が集まりやすい形状

一部でお湯が噴出したとの証言 → 断層等から流出した温泉水の可能性もある

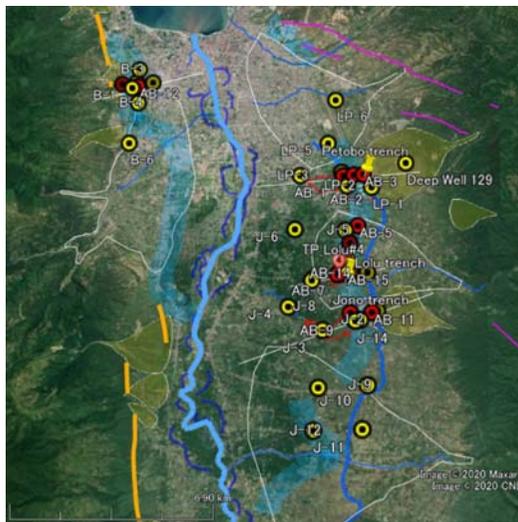
家屋の流動状況

中央の流れは速い

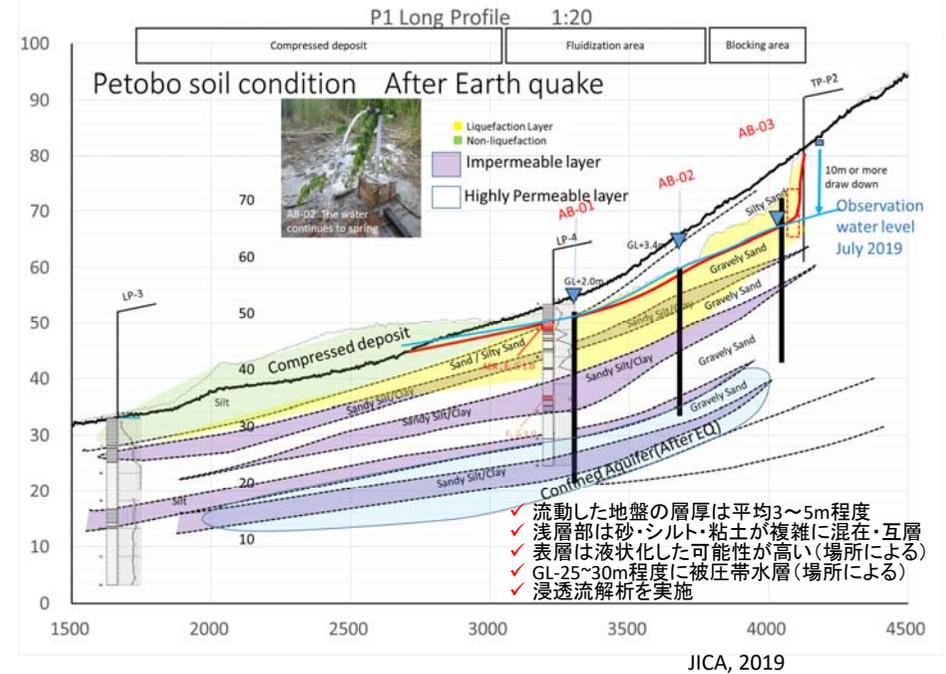




JICAによる調査



- 現場調査
- ◆ 住民ヒアリング
 - ◆ トレンチ・ピット掘削
 - ◆ 水質調査
 - ◆ ボーリング調査
 - ◆ SWS
 - ◆ 現場透水試験
 - ◆ PS検層
 - ◆ 攪乱・不攪乱試料採取
- 室内土質試験
- ◆ 物理試験
 - ◆ 室内透水試験
 - ◆ 液状化試験
 - ◆ 非排水繰り返し+せん断試験
- その他、個別調査
- ◆ 愛媛大G: トレンチ掘削(シバラヤ)
 - ◆ 九大G: DCPT・ドローン
 - ◆ 東大G: 室内試験・模型実験

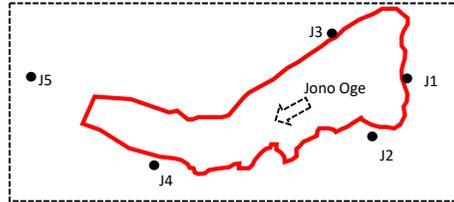
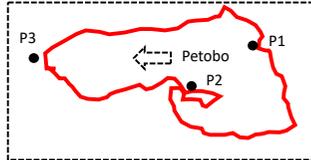
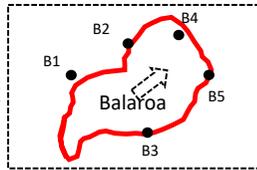


住民への聞き取り調査

地震後の地表水や地下水に関するアンケート

JICA, 2019

発災時の目撃者の位置



Result Summary in Balaroa

Location	Outline of interview result on groundwater / surface water
B1	Water did not blow out or spring from ground
B2	Water blew out due to the break of underground clean-water pipe at roadside
B3	A large quantity of water sprang and flowed at landslide site 20 seconds after the earthquake took place
B4	Water started to flow like a river 3 minutes after the earthquake and lasted for 3 days. A pond of the size of baseball field was created by the next day.
B5	Water did not blow out

Result Summary in Petobo

Location	Outline of interview result on groundwater / surface water
P1	In landslide area, water (sand boil with bad odor) started to blow out 1 minute after the earthquake.
P2	Warm water started to blow out 2 minutes after the earthquake with around 1m of water head. The water had been warm for 2 months but became lukewarm now.
P3	Hot water blew out 30 seconds after the earthquake and became a flood of 30 cm in height. There is no water now.

Result Summary in Jono Oge

Location	Outline of interview result on groundwater / surface water
J1	In landslide areas, muddy water started to blow out up to 6m in height from the ground 10 seconds after the earthquake and lasted for several seconds. Irrigation channel broke 2 minutes after and the water started to flow out of the channel.
J2	Water started to flow 1 minute after the earthquake and lasted for 2 days.
J3	The area was soaked in the water of 1m in height after a minute after the earthquake. The air got foggy due to sand boil when the earthquake took place.
J4	No change seen until the point 30 seconds after the earthquake, but village was covered by water one minute after the earthquake happened. Large-scale damage due to flood.
J5	There was a sediment flow after the earthquake, making houses half buried.

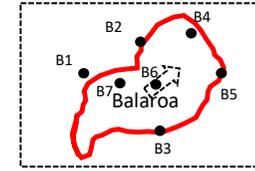
住民への聞き取り調査

地震後の地盤の変状・動きに関するアンケート調査

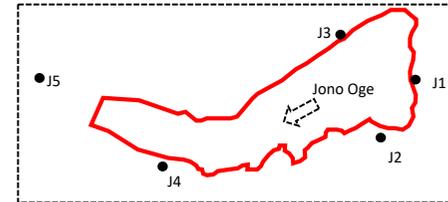
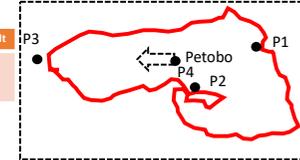
JICA, 2019

流動域内にいた人の答え

Loc.	Outline of interview result
B6	Ground lifted up to 4-5 m before horizontal movement. Ground rotated in counter-clockwise while flow.
B7	House was lifted up to 20m and rotated before collapsed.



Loc.	Outline of interview result
P4	Ground lifted up 1-2 min after earthquake, and the ground roared.



Result Summary in Balaroa

Location	Outline of interview result on groundwater / surface water
B1	Ground began to move around 15 seconds after the earthquake occurred. Water did not blow out.
B2	First, mud blew out from road when the earthquake happened. Next, water from sewage pipe blew out and flowed (10-20 seconds later), and then ground started to move (30 seconds later)
B3	Ground movement and water blowout took place at the same time around 20 seconds after the earthquake.
B4	Ground movement and water blowout took place at the same time around 2 minutes after the earthquake.
B5	Water did not blow out, but flowed at the same with the ground movement 20 seconds after the earthquake occurred.

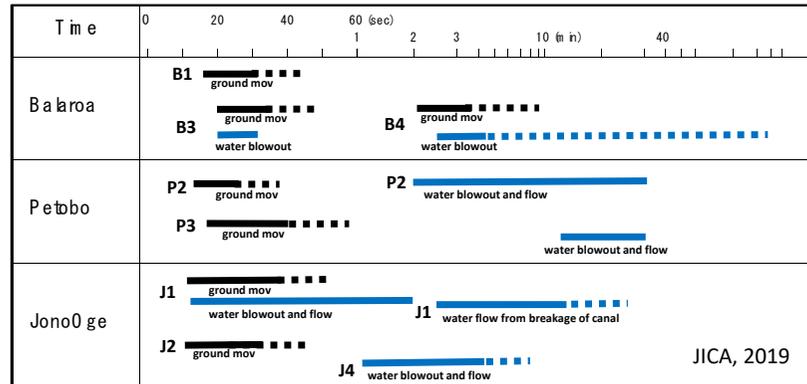
Result Summary in Petobo

Location	Outline of interview result on groundwater / surface water
P1	
P2	Ground movement happened first (15 - 30 seconds after the earthquake) and then water blew out (1 minute after) and flowed for 30 minutes.
P3	Ground movement happened first (15 - 30 seconds after the earthquake) and water blow-out followed shortly afterwards.

Result Summary in Jono Oge

Location	Outline of interview result on groundwater / surface water
J1	Ground started to move and water & mud blew out immediately after the earthquake (10 seconds later). Water started to flow from the breakage of irrigation channel 2 minutes after that.
J2	Ground started to move and water blew out immediately after the earthquake (10 seconds later). The water blow-out is due to broken drainage and water kept flowing for 2 days.
J3	Ground movement and water blowout/flow happened at the same time, both starting around 1 minutes from the earthquake occurrence.
J4	Water blowout took place during the movement of ground (1 minute after the occurrence of earthquake)

地震発生後に生じた地下水の噴き上げや地盤流動の時系列



JICA, 2019

地盤の流動は、地震発生の直後(十～数十秒以内)に発生した模様。

アンケート調査の結果は場所によりバラバラだが、すべての地すべり地で大量の水の噴き上げが確認されている。液状化の発生、被圧水の解放、断層からの温泉流出を示唆する。

長距離地盤流動メカニズム解明のカギ
表層地盤への水の継続的供給



ボーリング調査では被圧水を確認

長距離流動のメカニズムを考える

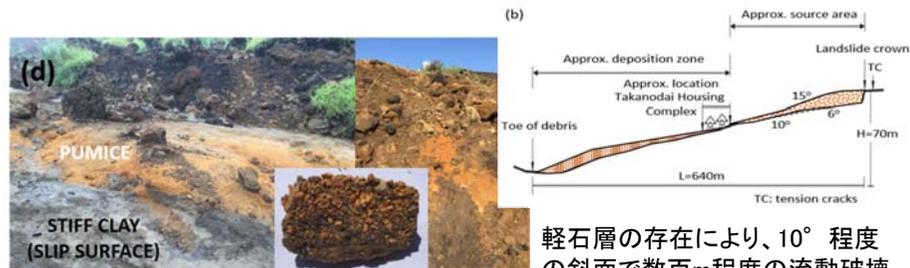
2011年東北地方太平洋沖地震による液状化側方流動



今まで液状化流動と称していたものとは流動レベルが全く違う

・クイッククレイや火山性堆積物などの特殊地盤だった？

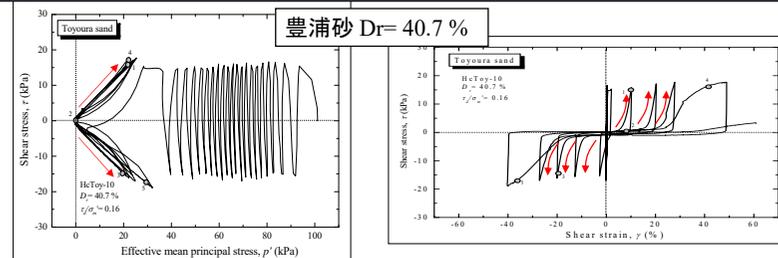
2016年熊本地震による阿蘇・高野台地すべり



軽石層の存在により、10°程度の斜面で数百m程度の流動破壊が発生

Chiara et al. (2018), IV GEESD, ASCE GSP 293:98-111

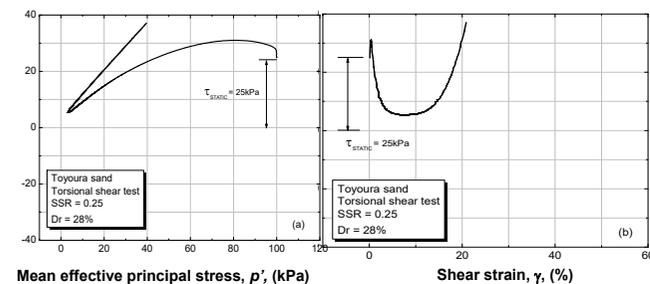
非排水繰返し载荷試験 (地盤の変形量には限界がある)



$\gamma = 10\%$; liquefaction

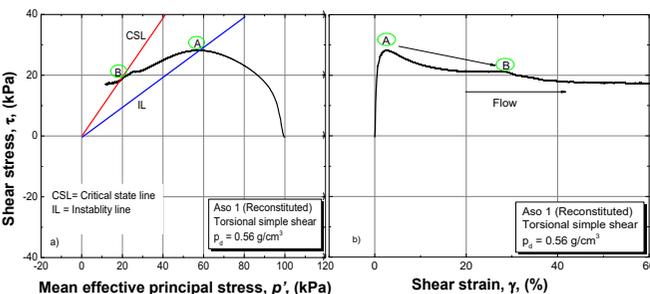


非排水単調ねじりせん断試験



豊浦砂

非常に緩い試料でも、せん断ひずみレベルが大きくなると剛性・強度は大きく回復する (緩斜面では大変形が生じにくい)

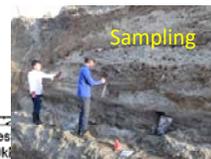
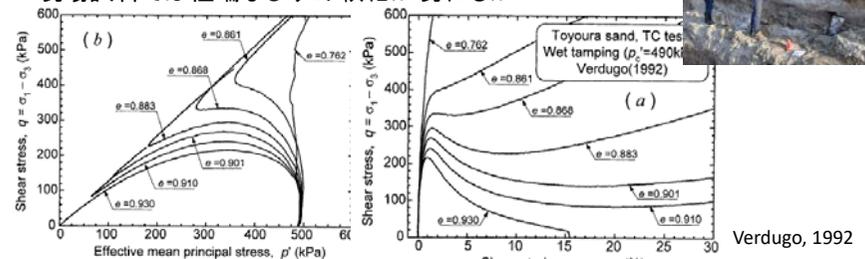


軽石 (Pumice)

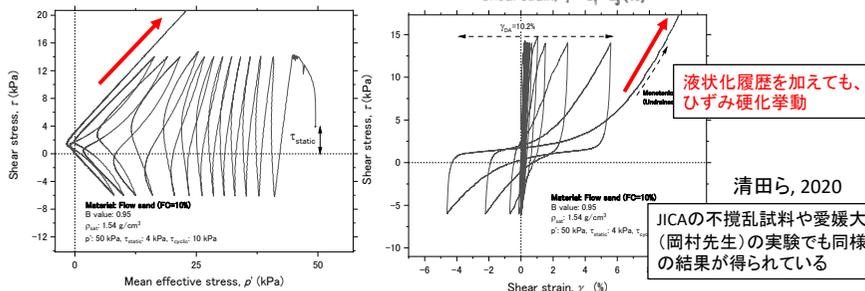
大きなひずみレベルでも強度低下傾向は継続。粒子破碎により非排水条件下では正のダイレイタンスーが生じにくい (大変形が生じやすい)

原位置試料を用いた非排水せん断試験

現場試料では極端なひずみ軟化が現れるか?



Verdugo, 1992



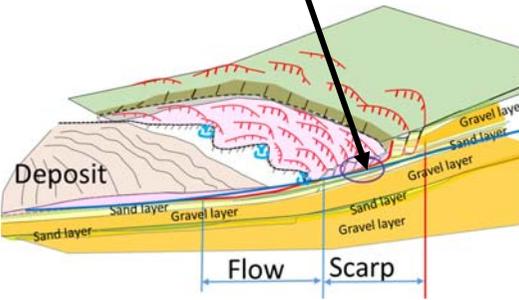
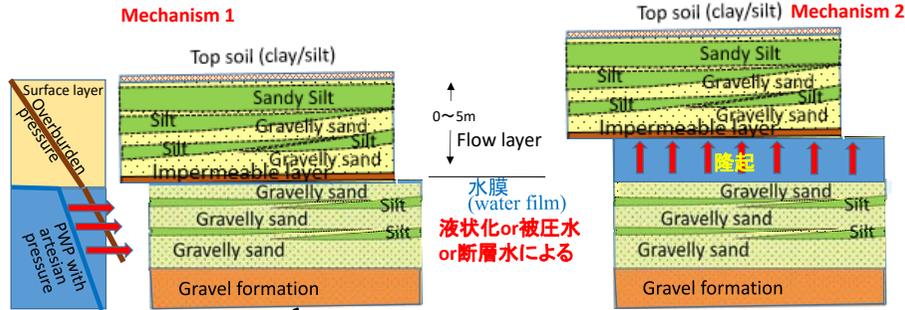
清田ら, 2020

液状化履歴を加えても、ひずみ硬化挙動

JICAの不攪乱試料や愛媛大(岡村先生)の実験でも同様の結果が得られている

地盤の特殊性や通常の液状化(非排水繰返しせん断)の考え方では流動は説明できない

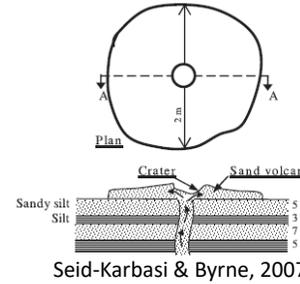
地下水の供給を想定した長距離地盤流動の推定メカニズム



目撃情報

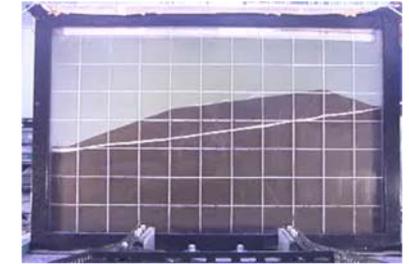
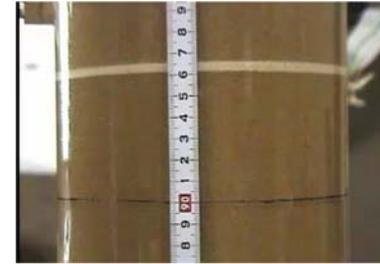
Location	Outline of interview result on groundwater / surface water
J1	In landslide areas, muddy water started to blow out up to 6m in height from the ground 10 seconds after the earthquake and lasted for several seconds.
Loc.	Outline of interview result
B6	Ground lifted up to 4-5 m before horizontal movement. Ground rotated in counter-clockwise while flown.
B7	House was lifted up to 20m and rotated before collapsed.
Loc.	Outline of interview result
p4	Ground lifted up 1-2 min after earthquake, and the ground roared.

水膜現象による地盤流動

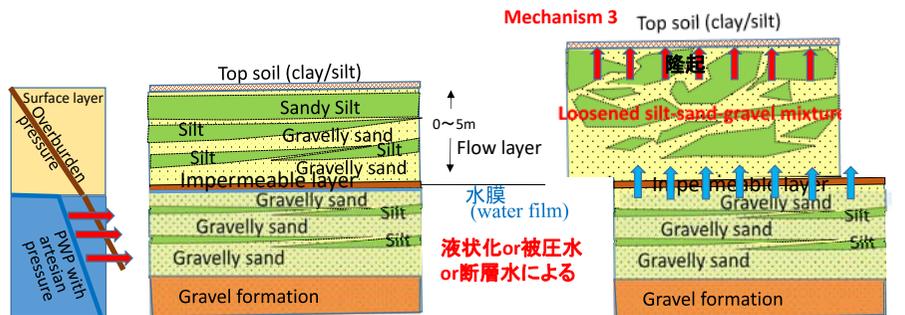


- ▶ 液状化により過剰間隙水圧が増加⇒地表に向けて消散：**噴砂**
- ▶ 液状化層をシルト層がキャップしていると、シルト層下面に**水の層(水膜)**が形成される(せん断抵抗ゼロ)
- ▶ シルト層とその上位層は、水膜に沿って**流動**

問題は水膜を形成する水の起源(液状化/被圧水/断層水)



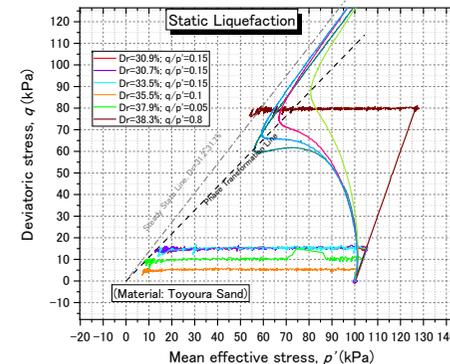
水膜による流動：国生先生より



地震から一か月後の様子
表層地盤は依然として泥水に近い。

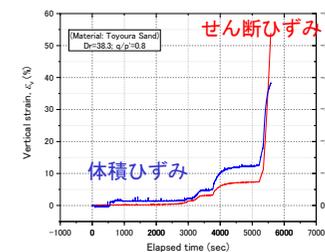
Static flow liquefaction under creep condition

一定せん断応力条件下で大変形に至る



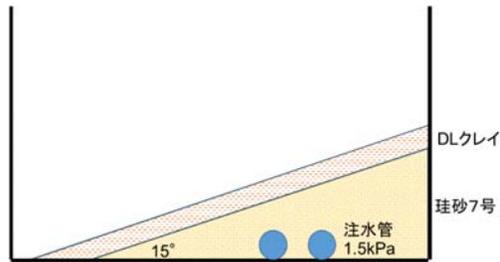
$Dr=44.9\%$, $\tau=7.5$ kPa, $p'=100$ kPa

正のダイレイタンス挙動と**地下水の継続的な供給**により、非常に緩い斜面勾配でもせん断ひずみは増加⇒**流動する**。



問題は水の起源(液状化/被圧水/断層水)

非常に簡単な模型実験



現場で生じた事象の再現

- ✓ 流動前の隆起
- ✓ 泥濘化して流動
- ✓ 地表面に水が流れる



流動を引き起こした水の起源諸説

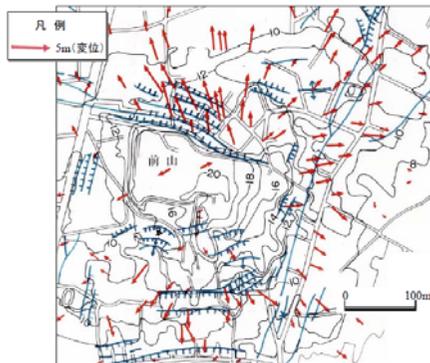
- ① 液状化層からの排水
- ② 被圧地下水
- ③ 断層等からの噴出水

事実確認

- ✓ 斜面勾配2~5%で流動距離は数百m以上(4か所)
- ✓ 地震後、十秒~数十秒後に流動開始
- ✓ 地震直後に数mもの住宅や地盤の隆起・上下動
- ✓ 地下からの大量の水の噴出(地盤は泥水状で波打ちながら流下)
- ✓ 温水の噴出
- ✓ 水膜や表層地盤への水の流入による流動コンセプトとの整合
- ✓ 津波ともリンクする海底地すべりとの関連

①液状化層からの排水

- ✓ 過去の液状化に起因する緩斜面の流動は数m程度(過去事例の液状化した斜面の全長は短かったからかもしれない)
- ✓ 震動終了から圧密透水~大量の水が出るまで数分以上かかる
- ✓ 地震直後の数m?もの住宅や地盤の隆起や上下動は説明できない

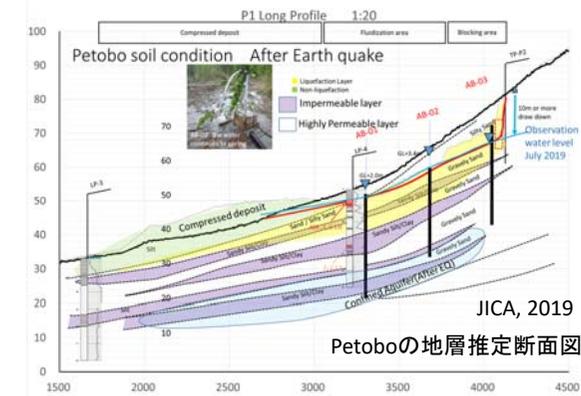


Balaroaで撮影された地震直後(流動前)の地盤隆起

濱田ら(1986) 1983年日本海中部地震, 能代市の例

①液状化層からの排水

- ✓ 流動エリアの液状化対象地盤(5m)が均一に完全に液状化すれば、水量は説明できる。しかし、液状化層が2mしかなくても数百m流動している箇所がある(Jono Oge赤い家周辺)
- ✓ 断層近傍のpoorな構造物でも無被害な程度の揺れで全層完全に液状化するか(周期の問題か)
- ✓ 液状化で温水の噴出は説明できないが、海外に事例はある。



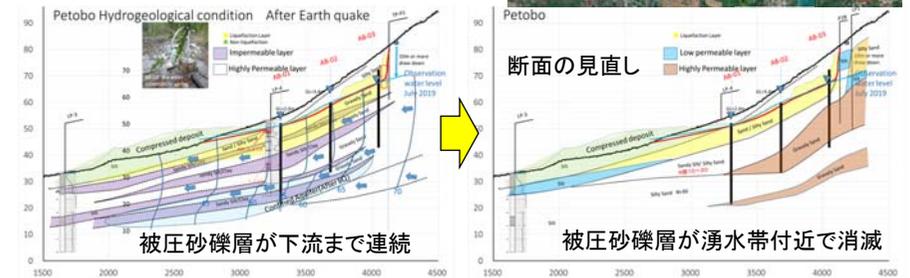
②被圧地下水

- ✓被圧地下水起源と確実に言える事例はない(赤城山南麓に歴史地震による崩壊跡がある)
- ✓震動直後に大量の水が出るには、表層近くまで被圧が及んでいる必要がある。Balaroaの井戸業者から「パイプを6m挿入すると、地表+1mの噴水が出る」との証言
- ✓地震直後の地盤隆起や上下動は説明可
- ✓流動を長時間継続させるの大量の水の存在は説明可
- ✓温水の噴出は説明できない(液状化を伴うのであればあり得る?)

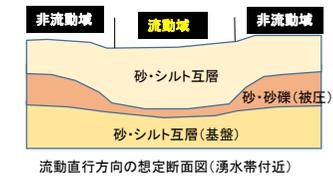
- 被圧地下水説は多くの事実と整合するが、相応の被圧が形成されていたことを定量的に示せるかが課題。
- 流動により地下水環境が変化しているため、地震後の現場調査情報のみでは限界がある

②被圧地下水

- ✓これまでの浸透流解析では、大きな被圧の存在は再現できなかった



- ✓ボーリング柱状図と物理試験結果を見直した結果、地震前に被圧されていたと考えられる砂礫層の分布が流動域と非流動域で大きく異なることが判明
- ✓他の流動箇所でも同じ傾向が確認された
- ✓見直しモデルでの浸透流解析を行う



③断層等からの噴出水

- ✓松代群発地震による牧内地すべりの例がある。斜面勾配は20度(36%)
- ✓ジオプレッシャーに起因する松之山地すべり
- ✓地下深部からの噴出と考えると、震動開始から水が出るまで数分以上かかる。地震前から断層水が地表近くまで浸透していれば、地震直後の噴出もあり得る。



Morimoto et al.(1967) 1966年松代群発地震による牧内地すべり

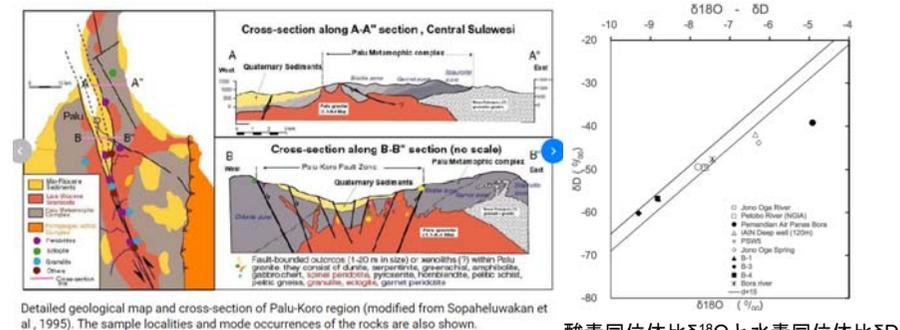


谷口(1964) 1962年松之山地すべり

③断層等からの噴出水

- ✓地震直後の地盤隆起や上下動は説明可
- ✓流動を長時間継続させるの大量の水の存在は説明可
- ✓温水の噴出も説明できる唯一の仮説

- 被圧地下水説と同様、多くの事実と整合する。しかし、高い間隙水圧が形成されていた深度や、水圧の定量的評価は難しい。
- より詳細な水質調査が必要



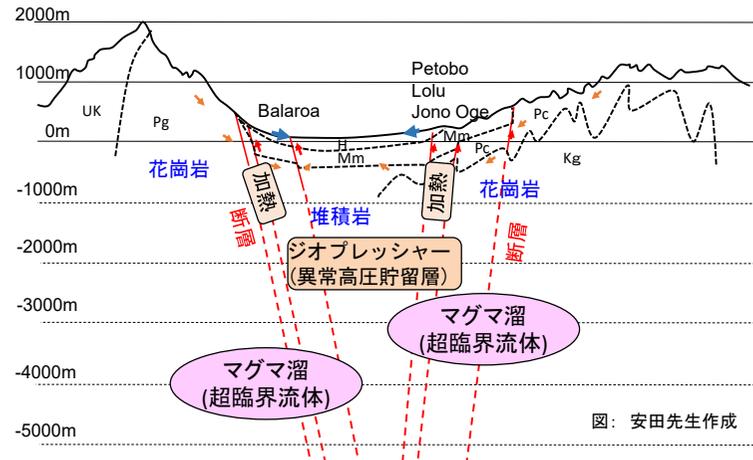
Detailed geological map and cross-section of Palu-Koro region (modified from Sopaheluwan et al., 1995). The sample localities and mode occurrences of the rocks are also shown.

酸素同位体比 $\delta^{18}O$ と水素同位体比 δD

③断層等からの噴出水

断層割目や断層帯からの湧水イメージ

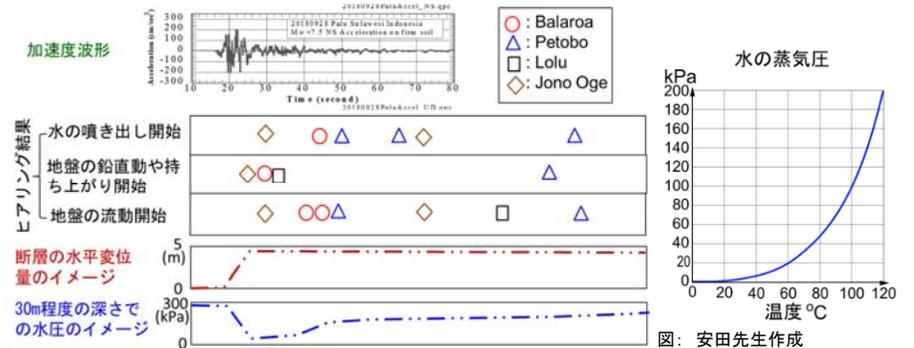
- ✓ スラブ起源、ジオプレッシャー、高温岩体からの過熱など、いくつかの温水起源が考えられる
- ✓ 1999年トルコ・コジャエリ地震(横ずれ断層)でも、地滑りでIzmit湾に没した地域で海水温上昇の証言がある



③断層等からの噴出水

断層運動により間隙が温水で満たされた密な地盤が非排水せん断

- ✓ 非排水せん断により、負の間隙水圧が発生 ⇒ ひずみと共に間隙水圧は標準大気圧以下となる
- ✓ 間隙水の沸点が低下し、間隙水の温度がある程度高ければ急激な沸騰が発生した蒸気が地下水を上昇させる
- ✓ 突飛なアイデアであるが、実験してみる価値あり



これまでのまとめ

Field survey

- 清田自身は4度の現場調査(JICAのチームは長期間常駐)
- ボーリング、トレンチ調査、室内試験、ヒアリングなど(愛媛大・九大も個別に活動)



Observations

- 数百~1km以上の流動が超緩斜面(1~4%)で発生。流動層の層厚は平均3~5m程度
- 流動は古い扇状地に挟まれた新しい扇状地の直下で発生
- 地盤流動は地震発生直後に発生し、流動時には大量の表面水・噴出水(一部温水)
- 流動直前に家屋・地盤の隆起・上下動(数m規模)が発生

Mechanism

- 液状化した地盤がそのまま流動した可能性は考え難い
- 水膜形成 and/or 表層への水の流入が長距離地盤流動を引き起こしたのでは
- 湧き出た水の起源(液状化・被圧水・断層水)の解明が大きな課題

謝辞

- 竹谷様をはじめ、JICAの皆様
- 古市様をはじめ、八千代エンジニアリングの皆様
- 林様をはじめ、基礎地盤コンサルタンツの皆様
- 石原先生、国生先生、安田先生、東畑先生、岡村先生、ハザリカ先生、渡邊先生、小野耕平先生
- Prof Irsyam, Dr. Hasbullah
- 東大生研、愛媛大、九州大の学生の皆様
- その他、多くの方々にお世話になりました。